JOSEPH E. BOWLES

ANALISIS DAN DESAIN PONDASI

EDISI KEEMPAT

JILID II

DAFTAR ISI

20-8 Getaran Berpasangan 439
20-9 Efek-efek Pembenaman Terhadap Respons Dasar Pondasi Dinamis 442
20-10 Pertimbangan Umum Dalam Mendesainkan Dasar Pondasi Dinamis 445

KATA PENGANTAR

Edisi keempat ini melanjutkan susunan bentuk dari edisi-edisi terdahulu untuk menyediakan keadaan-keadaan (SOA = *state-of-art*) dan praktek-praktek (SOP = *state-of-practice*) paling mutakhir yang berlaku dalam Rekayasa Pondasi. Berdasarkan interaksi antara penulis dan para pelaksana, saya berkesimpulan bahwa SOP rata-rata pada umumnya cenderung ketinggalan sekitar 10 tahun dari SOA. Namun demikian, terdapat suatu rentang dimana ada beberapa organisasi besar yang berada pada baris terdepan teknologi dan banyak perusahaan – khusunya yang lebih kecil – yang berada pada tingkatan menengah yang berlain-lainan.

Buku ajar ini yang juga secara luas dipakai sebagai sumber acuan oleh para pelaksana, mencakup bahan-bahan SOP tetapi dengan tekanan utama mengenai SOA yang sudah tercapai dengan memasukkan suatu campuran antara praktek, "cara bagaimana" dan teknologi paling mutakhir. Hal ini menghasilkan naskah yang cocok dengan tujuan-tujuan umum dari ASEE (Association of Engineers) dan organisasi-organisasi profesional lain yang memberikan tenggang waktu antara 5 sampai 10 tahun untuk para lulusan keteknikan (Insinyur) sebelum pendaluarsaan menjadi faktor utama.

Metode-metode rancangan cenderung untuk bervariasi di antara berbagai daerah geografis, untuk sebagian karena pengaruh para instruktur dan untuk bagian lain lagi karena hanya ada sedikit "hal yang mutlak dalam rancangan". Sebagai konsekuensi maka perlu untuk memasukkan metode-metode lain yang sudah diterima secara umum tetapi diperlembut dengan rekomendasi-rekomendasi dan saran-saran tentang pemakaiannya. Hal ini menunjukkan akses bagi para pemakai terhadap perbedaan-perbedaan regional maupun memberikan hasil-hasil perancangan yang "dipukulratakan" atau kesempatan untuk memilih cara yang paling sesuai atas dasar kekhasan tapak. Walaupun komentar ini tampaknya seolah terlalu berorientasi kepada praktek, kenyataannya ialah bahwa para mahasiswa harus waspada terhadap konflik, perbedaan dan alternatif ini dalam alam-nyata sehingga ia dapat produktif setelah ia lulus.

Buku ini memberi tekanan lebih banyak kepada metode-metode komputer dan metode elemen berhingga (FEM = finite element method) yang mencakup metode matriks dibandingkan dengan edisi-edisi terdahulu untuk mencerminkan peralihan yang seda

karena konstruksi ini telah menggantikan beton bertulang (R/C) dan dinding-dinding gaya berat/gravitasi konvensional hampir secara menyeluruh. Kebanyakan bahan tentang dinding pertebalan-belakang/counterfort telah ditiadakan karena jenis dinding ini hanya sangat sedikit yang dibangun dan mengingat biaya pembangunan dinding jenis ini yang mahal, maka program-program komputer adalah lebih sesuai untuk menganalisisnya. Dalam Bab 13 saya telah menyusun ulang analisis dinding bilah-bilah pancang agar mulai menempatkan FEM (dilakukan setelah diskusi yang luas dengan suatu organisasi utama pemerintah yang merupakan perancang/pemakai terbesar dari dinding-dinding bilah pancang) dan untuk memasukkan suatu program komputer spesifik untuk dinding bilah pancang (dan untuk galian batang desak). Bab 19 tentang dinding-dinding pemecah gelombang (piers) yang dibor hampir seluruhnya telah direvisi untuk meniadakan bahan-bahan mengenai konstruksi kaison (kini jarang dilaksanakan karena melibatkan biaya dan bahaya yang besar) dan untuk menekankan dinding-dinding pemecah gelombang-gelombang yang dibor berikut prosedur-prosedur analisis untuk beban-beban vertikal berdasarkan karya yang luas oleh Reese beserta para mitra-kerjanya di Universitas Texas. Juga diberikan pembahasan yang lebih banyak dan analisis yang khas tentang suatu dinding pemecah gelombang yang dibor dan dibebani secara mendatar/lateral (memakai data pengujian beban aktual untuk pembuktian). Saya telah membuat revisi menyeluruh atas Bab 20 guna meningkatkan kemungkinan pengajaran dan pemahaman atas analisis dan rancangan dasar dinamis serta menambah bagian yang besar tentang pondasi tiang pancang dinamis. Pendekatan baru yang dipakai (bersama dengan suatu program komputer) memberikan dasar-dasar yang hampir setara dengan suatu mata kuliah tentang Pondasi dinamis pada bab ini. Perbaikan-perbaikan dan tajuk-tajuk lain mencakup suatu revisi atas Bab 10 guna mencerminkan karya penulis ini tentang penyambungan Pondasi Winkler untuk telapak (mats). Dalam Bab 11 diberikan suatu analisis ulang pada masalah tekanan tanah mendatar dengan memakai Teori Elastisitas bersama-sama dengan pembuangan pemecahan-pemecahan grafis untuk tekanan tanah mendatar dan sebagai gantinya ialah pemakaian cara baji percobaan yang langsung dalam suatu program komputer yang tersedia. Persamaan-penurunan elastis dalam Bab 5 telah dikaji-ulang secara kritis dengan data pendukung untuk mensahkan suatu metode yang agak berbeda dalam pemakaiannya.

Sebagaimana halnya dalam edisi-edisi terdahulu di sini telah dimasukan contoh-contoh dalam jumlah yang sangat banyak. Contoh-contoh yang dipindahkan ke dalam edisi ini secara luas telah dibahas ulang dan/atau ditambahkan contoh-contoh baru dengan langkah-langkah penjelasan yang agak rinci dalam usaha mencapai hasil pemecahannya. Mirip dengan edisi-edisi terdahulu saya telah berupaya untuk memasukkan contoh yang realistik paling tidak dalam batas-batas ruang naskah yang tersedia. Contoh-contoh itu sering dikutip dari karya-karya yang telah diterbitkan sehingga instruktur dapat menyuruh para mahasiswa untuk melakukan penelitian latar belakang guna mendapatkan apresiasi tentang kesukaran-kesukaran yang terkait kepada usaha memakai karya orang lain yang telah diterbitkan dari jurnal-jurnal profesional. Pada tempat di mana contoh itu dikerjakan dengan tangan, biasanya diberikan komentar dan diskusi tentang hasil-hasilnya dan langkah berikut apa yang dapat terjadi dalam proses perancangan. Pada tempat di mana dipakai hasil (output) komputer, selalu diberikan beberapa komentar tentang bagaimana membuat pengecekan keluaran (output) untuk melihat apakah untuk model itu telah dicapai pemecahan yang benar. Hal ini melengkapi diskusi naskah sebelumnya tentang program komputer itu.

Saya ingin menyatakan penghargaan kepada banyak pemakai buku ini baik di Amerika Serikat maupun di negara-negara lain yang telah menuliskan atau membuat komentar atau kritik yang membangun atau sekedar menanyakan keterangan mengenai sesuatu prosedur. Saya juga mengucapkan terima kasih kepada mereka yang ikut serta di dalam penyelidikan pemakai buku Mc Graw-Hill untuk menyediakan masukan (input) untuk perbaikan ini dan

berlangsung dalam pemakaian kalkulator-kalkulator yang dapat diprogram kepada komputer-komputer pribadi (PC = personal computer) dan pemakaian FEM yang semakin luas di dalam praktek. Kebanyakan mahasiswa pada tingkat bahan buku-ajar ini telah menerima sejumlah metodologi FEM tentang kuliah-kuliah statika dan struktur elementer, dan metode-metode matriks sudah lumrah pada kuliah matematika yang perlu pada tingkat universitas. Bagaimana pun, buku ajar ini memberikan cukup teori berlatar belakang FEM sehingga seharusnya pada pemakaiannya secara rata-rata akan mendapat hanya sedikit kesulitan dalam pemakaiannya. Sebagai alat bantu lebih jauh, program-program komputer yang diberikan dalam Lampiran, memakai peristilahan yang sama seperti dalam teori buku-ajar dan diberi KOMENTAR secara berlimpah sehinga logikanya mudah diikuti.

Buku ini hampir secara keseluruhan telah ditulis ulang untuk memasukkan bahan baru yang sesuai dan banyak angka-angka yang dimodifikasi, gambar-gambar baru ditambahkan dan kesemuanya digambar ulang. Bahan-bahan baru itu mencerminkan kepustakaan geoteknik yang sangat banyak yang telah diterbitkan selama 5 tahun yang lalu – sering dengan kesimpulan-kesimpulan yang saling bertentangan – dan membutuhkan penyingkatan dan sintesis yang luas agar dapat ditempatkan dalam bentuk yang bermanfaat dan mudah dipakai.

Buku ini bukan suatu tinjauan kepustakaan, tetapi diperlukan daftar rujukan yang luas untuk melengkapi dan memberikan wewenang kepada bahan yang disajikan maupun untuk memberikan penghargaan profesional kepada mereka yang membantu terhadap kemajuan dalam ilmu pengetahuan dan praktek. Karena keterbatasan ruang, saya terpaksa membatasi pemberian rujukan sampai lebih dari satu dua kali untuk setiap pokok yang dibahas. Akan tetapi, karena rujukan yang disebut itu sendiri mengandung daftar-daftar yang panjang, maka pembaca yang berminta dengan mudah dapat membuat tehnik/pembuktian atau pengisian latar belakang dengan hanya sedikit upaya pencarian kepustakaan. Bila pembatasan daftar rujukan itu telah meniadakan suatu urusan yang penting, maka hal itu sangat disesalkan. Juga diharapkan bahwa para penulis muda tidaklah merasa tersinggung oleh praktek pemakaian istilah 'dan kawan-kawan' (at al.) bila terdapat rujukan yang disusun oleh lebih dari dua mitra-penulis.

Untuk meliput pokok Rekayasa Pondasi secara layak, perlu rentangan luas perihal bahan pokok bahasan sebagaimana yang ditetapkan oleh cakupan naskah seperti tercantum dalam Bab 1. Rentang bahan pokok bahasan itu dalam kesukaran penghitungannya berkisar dari keperluan pemakaian kalkulator bertaraf maju yang dapat diprogram sampai kepada komputer digital. Rentang bahan itu memungkinkan pemakaian buku ini untuk dipakai dalam kurikulum Rekayasa Sipil. Struktural, Arsitektural dan Konstruksi melalui pemilihan yang bijak tentang pokok persoalan dan untuk pemakaian selama paling sedikit dua tahun ajaran.

Ciri-ciri khas pada edisi ini mencakup penekanan lebih besar atas pemakaian komputer dan pemasukan program-program komputer lengkap tambahan pada Lampiran. Dalam edisi-edisi terdahulu, beberapa kebiasaan pembalikan/inversiyang dianggap dapat ditemukan secara umum dalam perpustakaan-perpustakaan pusat komputer telah dihilangkan untuk menghemat ruang naskah; hal-hal itu sekarang dimasukkan. Segala program yang dialihkan dari edisi-edisi terdahulu telah diperbarui menurut versi terakhir dalam keputusan program yang ada pada penulis. Pada tempat-tempat di mana dikerjakan contoh-contoh yang memakai suatu program komputer, berkas-berkas data yang lengkap baik memakai lembar-lembar hasil/output atau berikut program komputernya telah disenaraikan. Guna mengurutkan pokok bahasan secara lebih nalar, maka telah dibuat revisi-revisi besar dalam semua bab. Bab 12 mengenai tembok-tembok penahan telah ditata-ulang secara menyeluruh untuk mulai memperkenalkan tanah yang diperkuat/bertulang

termasuk.Richard Barksdale, Georgia Instute of Technology; Turgut Demirel,lowa State University; Robert Easton, Rochester Institute of Technology, Mete Oner, Oklahoma State University; Walter Sherman, Tulane University; Wen L. Wang, California State University, Los Angeles dan Richard Woods, University of Michigan, kepada pemeriksa terakhir naskah ini William Baron dari Clemson University.

Akhirnya saya menghargai kontribusi yang cukup banyak dari isteri saya Faye, yang telah membantu seperti biasanya dengan pengetikan dan banyak pekerjaan lain untuk menghasilkan naskah ini.

Joseph E. Bowles

Untuk Dosen:

Di bawah ini penulis menganjurkan mata kuliah pendekatan atau menggunakan buku teks ini untuk mata kuliah, lebih dari 3 kredit.

Kuliah Pertama diikuti melalui pilihan		Mata kuliah		2 Mata kuliah secara berurutan	
Bab:	Kuliah Periode	Bab	Periode	Bab :	Periode
1, 2	6	2–3	6	1–2	6
3, 4, 5	1–2 masing-masing	4, 5	6	3	3
6, 7	1–2 gabungan	8	2 topik-topik khusus	4, 5	6
8	lewatkan kecuali tidak mencakup pondasi telapak kaki dalam R/C	9	3	6, 7	3
9	2	10	6 pengkopelan, topik-topik khusus	8	3
10	1–2	11	3	9	5
11	2	12, 13	6	10	6
11	2	12, 13	5	20	selesai
12	pada tanah bertulang lewatan diam kecuali R/C tidak mencakup dinding	Mata kuliah pilihan		Mata kuliah wajib	
13–15	1–2 masing-masing	12–15	12	12	3
16–17	2–3 untuk keduanya	16, 17	9	13	5
18–20	untuk setiap bab	18, 19	15	14	4
R/C = mata kuliah beton bertulang juga harus diikuti oleh mahasiswa				15	3
				16, 17	6
				18	6
				19	selesai

Pendekatan di atas dan tergantung pada panjangnya semester dan pandangan dosen untuk topik-topik tertentu. Dengan penggunaan program komputer yang bebas (dalam Lampiran dan anjuran-anjuran yang lain yang digunakan dalam bab-bab tertentu) petunjuk dapat digunakan lebih efisien dan dengan mahasiswa lebih mampu menggunakan sejumlah telaah-telaah pada metrik pada saat melakukan pemeriksaan hasil yang dikehendaki untuk setiap tingkatan. Tidak ada hasil yang seharusnya diterima kecuali kalau mahasiswa-mahasiswa menempatkannya pada sketsa dengan rapi menunjukkan data masalah kritis dan yang mana nilai-nilai hasil telah diperiksa. Satu-satunya yang perlu lebih diperiksa dari pada penyajian akhir horisontal dan vertikal secara rutin dilakukan dengan program seperti suatu periksa sendiri internal. Mahasiswa harus menunjukkan gaya-gaya pada suatu simpul dan suatu keseimbangan, atau suatu perhitungan dari tanah, dan seterusnya., sebagai bagian dari hasil verifikasi. Juga memeriksa seperti penghitungan reaksi simpul dan tekanan tanah merupakan contoh-contoh yang berguna untuk memberikan pemakai program suatu pemahaman dari program apa yang sedang dilakukan.

DAFTAR SIMBOL-SIMBOL PRIMER YANG DIPAKAI DALAM TEKS

Bagaimana pun, daftar ini tak lengkap. Simbol-simbol ini biasanya diidentifikasi menurut pemakaian bila pemakaiannya berbeda dari yang diberikan berikut. Tidak semua tulisan di bawah garis (subscripts) yang diperlihatkan.

A = luas atau dipakai sebagai koefisien, dapat ditempatkan pada garis bawah
B = ukuran alas lateral terkecil (ada kalanya dinyatakan sebagai $2B$)
B' = $B/2$ bila ukuran alas = B
C_c = indeks kompresi (Bab 2 dan 5)
C'_c = rasio kompresi (Bab 2)
C_r = indeks kompresi – ulang (Bab 2 dan 5)
C_α = indeks kompresi sekunder
c = kohesi tanah
c_i = konstanta peredaman dipakai dalam Bab 20 ($i = x$, y, z, dan θ_i)
c_v = koefisien konsolidasi (Bab 2)
D = kedalaman alas telapak atau tiang pancang
D_c = seluruh ketebalan dari pelat/alas beton
D_r = kerapatan nisbi
d = kedalaman efektif dari suatu pelat dasar beton (menurut c.g.s. dari tulangan).
E_c = modulus elstisitas beton
E_p = modulus elastisitas bahan tiang pancang (Bab 20)
E_s = modulus regangan-tegangan atau modulus deformasi tanah (juga modulus elastisitas).
E_i = lambang koefisien energi dipakai dalam Bab 3 untuk menunjukkan nilai-nilai SPT
e = rasio kosong (void)
e_0 = rasio kosong langsung di tempat (in situ)
F_0, F = gaya-gaya dinamik seperti yang dipakai dalam Bab 20;
F_0 = nilai dasar ; F = nilai pada ωt
f'_c = kekuatan kompresi beton pada 28 hari
f_y = kekuatan luluh pada tulangan baja, tiang pancang baja dan bagian-konstruksi baja lainnya.

f_a = tegangan baja yang diizinkan
G' = modulus tegangan-regangan geser (shear) pada tanah atau bahan lainnya yang dihitung dengan memakai Pers. (*b*) dari Pasal 2-14 atau menurut metode dinamik yang diberikan dalam Bab 20.
G_s = berat jenis butir tanah yang menyusun suatu massa tanah tertentu (yang diberikan).
GWT = tinggi muka air tanah. (MAT).
H = kedalaman pengaruh pada telapak (Bab 5); ketebalan lapisan; juga dipakai untuk ketinggian dinding dalam Bab 11–15, dan untuk tinggi energi (head) hidrolik dalam Bab 2.
I_i = koefisien pengaruh penurunan dipakai dalam Bab 5.
I_p = indeks plastisitas = $W_L - W_P$.
$I_{\phi i}$ = kelembaman massa untuk modus putaran dalam Bab 20.
J_a = koefisien yang ditentukan dalam Bab 20.
J = momen puntir pada kelembaman.
K = rasio lateral terhadap tegangan vertikal.
K_o = rasio tegangan lateral/vertikal langsung di tempat (atau dalam keadaan diam).
K_a = koefisien tekanan tanah aktif = $\tan^2 (45 + Q/2)$
K_p = koefisien tekanan tanah pasif = $\tan^2 (45 + Q/2)$
K_z = pegas tanah vertikal untuk pondasi balok-atas-elastis, alas hamparan dan alas bergetar.
K_i = pegas tanah dinamik horisontal ; $i = x, y$ dan z dipakai dalam Bab 20.
K_{Qi} = pegas dinamik berputar; $i = x, y$ dan z yang dipakai dalam Bab 20.
k = koefisien permeabilitas; k_x, k_y = nilai-nilai horisontal dan vertikal.
k_s = modulus reaksi lapisan bawah (subgrade) baik vertikal atau horisontal.
k'_s = $k_s B$ yang dipakai sebagai pembebanan balok dalam Bab 9.
L = panjang alas atau telapak; juga panjang tiang pancang.
m = eksponen; juga dipakai untuk massa = W/g dalam Bab 20.
N = hitungan pukulan SPT.
N_i = hitungan pukulan SPT pada i = efisiensi sebesar 55, 60, 70 persen, dan sebagainya.
n = porositas, juga dipakai sebagai suatu eksponen.
OCR = rasio konsolidasi berlebihan
P_a = gaya dinding yang disebabkan oleh tekanan tanah aktif
P_p = gaya dinding yang disebabkan oleh tekanan tanah pasif
P_o = tekanan vertikal langsung di tempat pada suatu kedalaman z.
P'_o = tekanan vertikal efektif pada suatu kedalaman z.
P'_c = tekanan pra-konsolidasi efektif pada suatu kedalaman z.
Q = gaya vertikal (juga V dan terkadang P).
q = tekanan beban-lebih = γz dipakai bergantian dengan P_o
$\bar{q}$ = tekanan beban-lebih efektif
q_o = tekanan kontak telapak (atau alas)
q_{ult} = tekanan tumpuan dihitung akhir (ultimate)
q_a = tekanan dukung yang diizinkan
q_u = kekuatan kompresi yang tak-tertahan
R = gaya resultan – biasanya terhadap sebuah dinding seperti dalam Bab 11.
S = derajat kejenuhan (Bab 2)
S_t = kepekaan lempung (clay) (Bab 2)

S = kekuatan geser
s_a = kekuatan geser yang tak-tersalurkan (sering $s_u = q_u/2$).
T = faktor waktu untuk analisis konsolidasi
u = tekanan air pori (atau netral).
w = kandungan air; w_N = alami (langsung di tempat); w_L = batas cairan; w_p = batas plastis
$\bar{y}$ = lokasi gaya resultan R dalam Bab 11; sifat eksentrisitas suatu massa berputar dalam Bab 20 seperti $F = m_e \bar{y} \omega^2$
z = kedalaman yang diminati dari permukaan tanah
α = sudut yang dipakai dalam Bab 4; faktor reduksi kohesi dalam Bab 16.
β = sudut kemiringan tanah atau urugan; faktor tahanan kulit dalam Bab 16.
β_d = sebagian dari hasil persamaan diferensial atau koefisien peredaman intern yang dipakai pada Bab 20.
γ = satuan berat bahan; tulisan bawah garis (subscript) c = beton, kering, basah, jenuh (sat), dan sebagainya.
γ' = berat satuan efektif yang dihitung sebagai $\gamma' = \gamma - \gamma_\omega$
δ = sudut gesekan antara bahan seperti tiang pancang terhadap tanah, dan sebagainya.
ΔH = penurunan pondasi seperti yang dipakai dalam Bab 5 dan Bab 18.
Δq = pertambahan tegangan dalam lapisan dari beban telapak atau beban tiang pancang.
Δu = tekanan air pori berlebihan
ϵ = regangan $= \Delta q/E_s$ (atau q/E_s).
η = sudut kemiringan alas dalam Bab 4.
K_i = pengali untuk pegas dinamik K_i dalam Bab 20.
λ = pengali untuk Bab 16; dengan tulisan bawah garis terdapat pengali peredaman dinamik pada Bab 20.
μ = rasio Poisson =

$$\frac{\text{regangan tegaklurus terhadap tegangan yang diterapkan}}{\text{regangan pada arah tegangan yang diterapkan}}$$

ρ = kerapatan massa pada tanah atau bahan lain; juga dipakai sebagai sudut perpecahan dari baji tanah yang tertahan oleh suatu dinding.
σ_i = tekanan atau tegangan; i = arah seperti x, y atau z
σ_o = tekanan normal efektif yang dihitung sebagai $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$
ϕ = sudut gesekan dalam
ϕ' = sudut gesekan dalam yang efektif

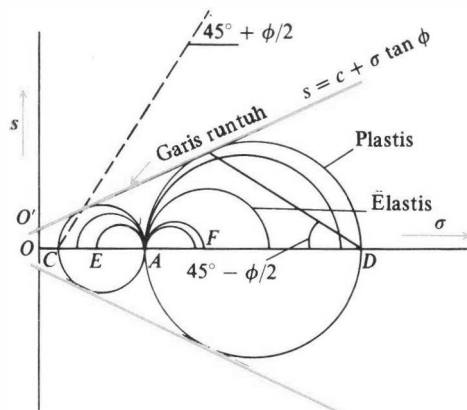
BAB 11

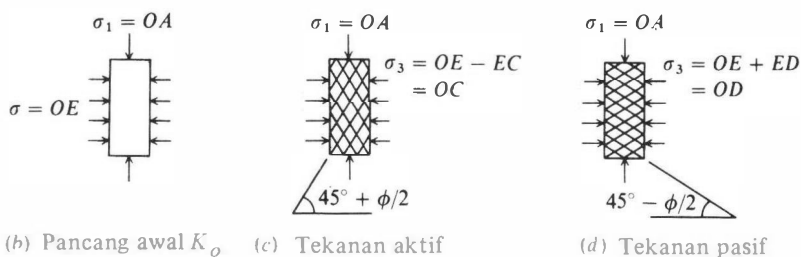
TEKANAN TANAH LATERAL

11-1 MASALAH TEKANAN TANAH LATERAL

Tekanan tanah lateral adalah sebuah parameter perencanaan (design parameter) yang penting di dalam sejumlah persoalan teknik pondasi. Dinding penahan dan dinding papan turap (sheet-pile wall), galian yang diperkokoh dan juga yang tak diperkokoh (braced and unbraced excavations), tekanan searah (grain pressure) pada dinding silo dan tempat penyimpanan bijian (bin), tekanan tanah atau batuan pada dinding terowongan dan konstruksi-konstruksi lain yang ada di bawah tanah, semuanya ini memerlukan perkiraan tekanan lateral secara kuantitatif pada pekerjaan konstruksi, baik untuk analisa perencanaan maupun untuk analisa stabilitas.

Metode kesetimbangan plastis (plastic equilibrium) seperti yang dijelaskan dalam selubung keruntuhan Mohr (Mohr rupture envelope) pada Gambar 2-18 dan Gambar 11-1*a* adalah metode yang biasa digunakan untuk memperkirakan tekanan lateral pada tanah dan bahan-bahan lain seperti bijian, batu bara dan bijih tambang (ore). Pada keadaan tertentu digunakan metode elemen-hingga (finite element method—FEM) (dari kontinuum elastis), tetapi metode ini mempunyai beberapa segi kekurangan tertentu (distinct disadvantages) untuk perencanaan yang biasa dilakukan. Tekanan pada sambungan pipa terowongan yang dilas (tunnel liner) dan pipa selubung (conduit) besar yang tertanam di bawah tanah lebih sesuai untuk FEM daripada analisa lainnya.

Tekanan tanah timbul selama pergeseran tanah (soil displacement) (atau selama peregangan) tetapi sebelum tanah tersebut mengalami keruntuhan (on the verge of failure), seperti yang didefinisikan oleh selubung keruntuhan Mohr, maka tegangan-tegangan (stresses) tersebut tidak mempunyai harga tertentu (indeterminate). Tegangan-tegangan tersebut juga belum tentu terdapat pada bagian yang runtuh (rupture) karena sangat sukar untuk menghasilkan keadaan kesetimbangan plastis secara serempak di mana-mana di dalam massa tanah—hal ini biasanya merupakan peristiwa yang progresif. Walaupun demikian, hal ini pada prakteknya sudah biasa dianalisis sebagai suatu kejadian keadaan yang ideal, baik untuk mempermudah persoalannya maupun dari segi pembatasan parameter tanah yang diperlukan dengan tingkat reliabilitas yang tinggi.

(*a*) Lingkaran Mohr K_o dan pada kesetimbangan plastis (atau runtuh).

(*b*) Pancang awal K_o (*c*) Tekanan aktif (*d*) Tekanan pasif

GAMBAR 11-1 Ilustrasi konsep kesetimbangan elastis dan kesetimbangan plastis. Perhatikan bahwa di dalam *c* dan *d* garis-garis gelincir adalah sangat ideal.

Dengan mengacu kembali pada Gambar 11-1*a*, terdapat dua lingkaran yang dapat dibuat melalui titik *A* sebagai titik pusat dan yang menyinggung garis runtuh (rupture line). Kedua lingkaran ini menyatakan sebuah keadaan kesetimbangan plastis di dalam peregangan bidang (plane strain). Salah satu dari lingkaran-lingkaran lain seperti *EA* atau *AF* akan menyatakan suatu keadaan tunak (steady state condition) (K_0) yang tergantung pada hasil perbandingan overkonsolidasi (overconsolidation ratio) (OCR) seperti yang didefinisikan dalam Bagian 2-4 (lihat juga Bagian 2-8).

11-2 TEKANAN TANAH AKTIF

Tekanan tanah aktif mengacu pada suatu kesetimbangan plastis yang digambarkan pada lingkaran runtuh (rupture circle) *AC* di dalam Gambar 11-1*a*. Keadaan setimbang ini didapatkan dari Gambar 11-1*b* dan *c* sebagai berikut. Pertama-tama gunakan tegangan *OA* dan tegangan *OE* sedemikian rupa sehingga diperoleh kondisi K_0. Selanjutnya secara berangsur-angsur turunkan *OE* menjadi runtuh pada *OC*. Tegangan *OA* (maksimum) dan tegangan *OC* (minimum) dapat digunakan untuk menggambarkan sebuah lingkaran Mohr. Selisih antara *OA* dan *OC* sama dengan diameter lingkaran dan juga tegangan penyimpang (deviator stress) seperti yang akan didapat dari percobaan triaksial Ck_0 di dalam laboratorium Gambar 2-34, Kasus 2. Garis-garis gelincir tersebut akan mempunyai bentuk seperti yang diperlihatkan dalam gambar, karena bidang-bidang horisontal dan vertikal yang menjelaskan elemen tanah di dalam Gambar 11-1*b* adalah bidang-bidang utama (principal

planes) bila keadaan K_0 telah dicapai. Hal yang terakhir ini didasarkan pada susunan bahan-bahan dan tak tergantung pada sifat bahan yang bersangkutan; akan tetapi, pengamatan pada bentuk dinding-dinding dalam pasir menunjukkan bahwa sudut ini akan terbentuk.

Tekanan utama minimum $OC = \sigma_3$ ini dinamakan tekanan tanah aktif dan dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.42); untuk mudahnya maka kita ulangi lagi di sini:

$$\sigma_3 = \sigma_1 \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) - 2c \tan\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) \quad (2\text{-}42)$$

Persamaan ini dikembangkan oleh Coulomb kira-kira pada tahun 1776 di dalam bentuk yang sangat berlainan. Tetapi kelihatannya Bell (1915)-lah yang pertama sekali memperkenalkan bentuk persamaan di atas. Persamaan ini sering ditulis di dalam literatur Eropa sebagai hubungan trigonometrik untuk fungsi tangen (tangen function) yang berikut:

$$\tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) = \frac{1 - \sin\phi}{1 + \sin\phi} \qquad \tan\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) = \frac{1 - \sin\phi}{\cos\phi}$$

Mari kita selidiki keterlibatan praktis dari Gambar 11-1 dengan memakai Gambar 11-2. Dalam Gambar 11-2 kita telah menyisipkan sebuah dinding dengan ketebalan nol ke dalam massa tanah tak berkohesi yang terkondolidasi normal (kita dapat memakai setiap jenis tanah tetapi cara ini menyederhanakan pembahasan). Pada titik ini kita mempunyai keadaan tegang K_0 pada dinding dan tekanan lateral (tanah-ke-dinding atau dinding-ke-tanah) berdasarkan ketentuan K_0 adalah

$$\sigma_h = K_o \sigma_1$$

dan berbentuk segitiga karena pada kedalaman z manapun maka tekanan vertikal $\sigma_1 = \gamma z$. Karena tanahnya terkonsolidasi normal maka K_0 dapat ditentukan oleh rasio tegangan kualitatif dari Gambar 11-1*a* sebagai

$$K_o = \frac{OE}{OA}$$

Sekarang mari kita gali tanah pada sisi kiri dari dinding Gambar 11-2*a* sampai suatu kedalaman H dalam Gambar 11-1*b* dan *c*. Kalau dinding itu tidak bergeser pada titik B (dinamakan garis keruk), maka dinding itu mungkin:

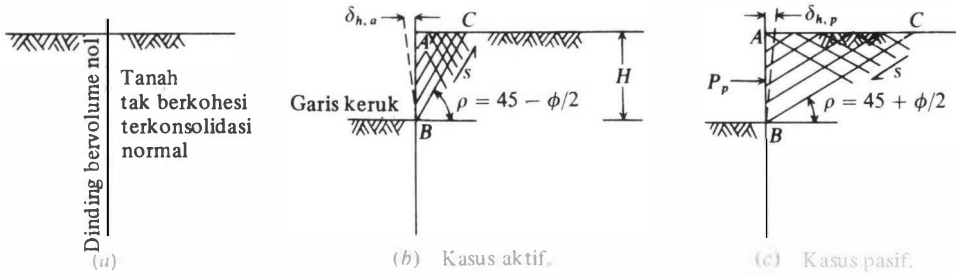
Berbelok ke samping (lateral) di bawah pembebanan balok konsol yang menyebabkan terbentuknya bidang-bidang garis galincir dalam tanah seperti pada Gambar 11-1*c* dan tekanan lateral $\sigma_h = \sigma_3$ pada rajahan lingkaran Mohr, sehingga bergerak dari E ke O. Kasus Gambar 11-1*c* berkembang karena tekanan K_0 yang dikenakan atas dinding tersebut berkurang pada waktu hal itu membelok menjauhi (tetapi diikuti) oleh tanah.

Kalau perpindahan tanah itu mencukupi, tekanan lateral itu mencapai keseimbangan plastis pada OC dan tekanan dindingnya adalah minimum (dinamakan "kasus tekanan aktif") sebesar

$$\sigma_h = \sigma_1 K_a$$

dari Persamaan (2-42). Kasus tekanan minimum ini dapat diterangkan dari pengamatan bahwa pasak gelincirnya adalah suatu volume minimum pada $45 + \phi/2$ dari horisontal (kemiringan garis dari C ke titik tangen dari Gambar 11-1*a*) dan ketahanan geser pada bidang geser menahan pasak itu menggelincir ke dalam dinding.

Suatu defleksi lateral yang terbatas memberikan tekanan dinding yang lebih besar —tetapi tak-menentukan—ditengah-tengah antara OC dan OE. Sebabnya ialah bahwa

(*a*) (*b*) Kasus aktif. (*c*) Kasus pasif.

GAMBAR 11-2. Pengidealan tekanan tanah aktif dan pasif dari suatu K_o yang berkembang dengan menyisipkan dinding dengan ketebalan nol (volume) ke dalam suatu massa tanah seperti pada (*a*)

tanah memerlukan suatu regangan pembatas untuk mengerahkan tahanan geser maksimum pada bidang gelincir. Kasus tekanan aktif ini digambarkan sebagai kasus no. 2 dari Gambar 2-34.

2. Tidak membelok sama sekali kalau tidak cukup kaku dan dalam kasus ini tekanan lateralnya tetap berada pada

$$\sigma_h = \gamma z K_o$$

Karena suatu perpindahan lateral dari dinding menghasilkan suatu keadaan tekanan tanah aktif di mana tekanan dindingnya menurun sampai suatu minimum, kita dapat bertanya apa yang akan terjadi jika tidak ada dinding. Dalam kasus ini kita mempunyai $\sigma_3 = 0$ dan nyata bahwa jika tekanan tanah dikerahkan pada sembarang bidang gelincir (seperti *BC* dari Gambar 11-2*b*) tidak mencukupi untuk memenuhi statika dari pasak *ABC* akan tergelincir ke dalam galian. Hal ini dengan mudah dapat diamati dalam suatu galian kecil dalam pasir kering di mana sisi-sisinya membentuk lereng dengan suatu sudut terhadap horisontal.

Hal itu seharusnya juga jelas bahwa pada waktu suatu lubang dibuka maka tanah di sekelilingnya akan serentak berpindah secara menyamping (lateral) sepanjang bidang gelincir yang serupa ke dalam rongga. Pada waktu hal ini terjadi maka setiap gawai (alat) yang disisipkan ke dalam lubang tersebut mula-mula harus "mendorong" tanah yang terpindahkan ini kembali ke dalam tempat aslinya sebelum keadaan setempatnya dapat direproduksi. Ternyata bahwa mendorong tanah kembali ke dalam tempatnya semula adalah hampir tak-mungkin, dan selain itu kita mengadakan perubahan dalam struktur tanah. Hal ini membuat sangat sukar untuk mengukur K_0 dalam setiap lubang yang digali—termasuk lubang pemboran.

Karena dinding itu harus memutar/memindahkan ke arah samping menjauhi tanah yang tertinggal untuk menghasilkan kondisi tekanan tanah aktif (atau K_a), maka pertanyaan yang menarik perhatian ialah berapa banyak perputaran yang diperlukan? Secara sederhana hal ini diselidiki dan yang berikut dapat dipakai sebagai pedoman.

Tanah dan keadaan	Banyaknya pengalihan, $\delta_{h,a}$
Tak berkohesi, padat	0,001 sampai 0,002*H*
Tak berkohesi, longgar	0,002 sampai 0,004*H*
Kohesif, keras	0,01 sampai 0,02*H*
Kohesif, lunak	0,02 sampai 0,05*H*

Sebagaimana telah dicatat sebelumnya, kalau tidak terdapat perpindahan lateral yang cukup maka tekanan dinding tersebut tidaklah tertentu di antara K_0 dan K_a. Kebanyakan dinding itu dirancang untuk menahan tekanan tanah aktif karena setiap perputaran untuk keruntuhan biasanya cukup untuk membentuk kasus tekanan minimum (atau aktif). Pada tempat-tempat di mana geometri dinding itu sedemikian rupa sehingga tekanan aktif itu tak dapat dikembangkan, maka akan perlu untuk merancang dinding tersebut untuk tekanan menyamping (lateral) yang lebih tinggi. Suatu dinding lentur selamanya sangat mungkin untuk terdeformasi secukupnya untuk kasus tekanan aktif sebelum terjadi kerusakan; akan tetapi, suatu dinding yang sangat kaku mungkin akan tiba-tiba tergeser tanpa diberi kesempatan untuk berkembangnya tekanan tanah yang aktif.

11-3 TEKANAN TANAH PASIF

Keadaan tekanan tanah pasif diberikan oleh lingkaran Mohr yang lebih besar dari Gambar 11-1*a*. Keadaan ini dikembangkan dengan memperoleh kondisi-kondisi K_0 dari Gambar 11-1*b* dan memelihara agar *OA* konstan sementara kita menambah tekanan lateral dari *OE* sampai kepada kerusakan keseimbangan plastis pada *OD* (dan situasi kasus 4 dari Gambar 2-34). Bidang-bidang gelincir dalam tanah itu sekarang membentuk sudut sebesar $45-\phi/2$ dengan horisontal dan merupakan ϕ dari keadaan aktif. Orientasi sudut gelincir ini diperlihatkan oleh garis dari *D* sampai ke titik tangen dari lingkaran Mohr besar pada Gambar 11-1*a*.

Tegangan utama mayor (major) $OD = \sigma_1$ dapat dihitung secara analitis dari lingkaran Mohr sama halnya seperti tekanan aktif untuk mendapatkan Persamaan (2-41) dalam Bagian 2-11, yang diulangi lagi penulisannya di sini untuk memudahkan kita

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) + 2c \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (2\text{-}41)$$

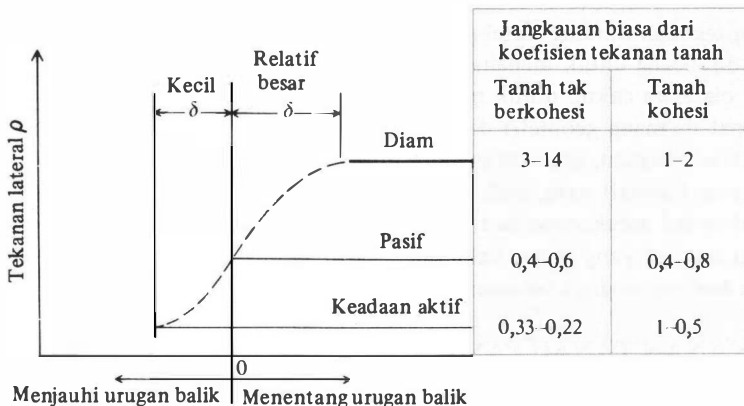
Tekanan tanah pasif dikembangkan dengan meningkatkan tekanan lateral dari *OE* sampai *OD* dalam Gambar 11-1*b* dan *d* hal ini sama dengan mendorong dinding dari Gambar ke dalam tanah. Tanah tersebut akan mengalami perubahan bentuk deformasi dan dengan perubahan bentuk yang cukup maka dikerahkanlah tahanan geser maksimum; akan tetapi perhatikan:

1. Volume baji tahanan adalah jauh lebih besar.
2. Tahanan geser yang dikerahkan *s* menentang dinding tersebut (di mana dalam kasus aktif hal itu membantu dinding).

Perubahan dalam pasak tahanan *ABC* merupakan sebab utama mengapa suatu dinding yang bergerak maju sampai ke kasus tekanan aktif minimum tak dapat didorong kembali kepada posisinya semula.

Gambar 11.3 menggambarkan pergerakan relatif dan urutan besarnya koefisien tekanan tanah lateral yang didapat dari perbandingan analitis dalam Persamaan (2-41) dan (2-42). Tekanan tanah pasif yang khas yang dibentuk oleh pelat angker atau balok-balok yang dibenamkan ke dalam tanah memakai sebuah batang atau kabel regang sehingga kabel tersebut menarik balok itu terhadap tanah. Kasus tekanan pasif lain adalah tanah di bawah garis keruk dari Gambar 11-2 yang harus menahan dinding agar tidak bergerak maju dari titik *B* menurun sehingga tekanan aktif dapat dibentuk dibelakang dinding dari pasak tanah yang ditentukan oleh garis *BC*.

Pembahasan ini dilakukan atas dasar teoretis. Sekarang kita harus mempunyai sesuatu untuk menerapkan asas-asas ini dengan cara yang umum untuk menilai berapa besar tekanan tanah itu untuk terapan-terapan tertentu. Dewasa ini terdapat dua prosedur umum

Jangkauan biasa dari koefisien tekanan tanah	
Tanah tak berkohesi	Tanah kohesi
3–14	1–2
0,4–0,6	0,4–0,8
0,33–0,22	1–0,5

GAMBAR 11-3. Gambaran tekanan aktif dan pasif dengan jangkauan perubahan harga biasa untuk tanah tak berkohesi dan untuk tanah yang kohesif.

untuk massa tanah dan sebuah teori metode elastisitas untuk beban-beban atas massa tanah yang harus ditahan oleh dinding itu. Metode-metode ini akan ditinjau dalam beberapa bagian yang berikut.

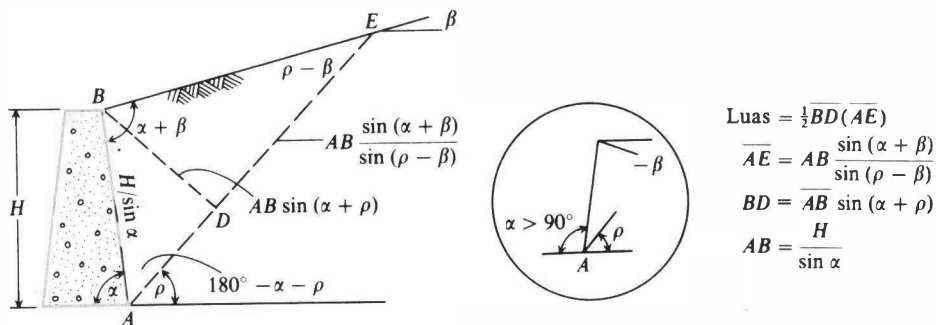
11-4 TEORI TEKANAN TANAH COULOMB

Anggapan-anggapan dasar di dalam teori tekanan tanah yang dikemukakan oleh C.A. Coulomb sekitar tahun 1776 (teori tekanan tanah Coulomb) adalah sebagai berikut:·

1. Tanah adalah isotropik dan homogen yang mempunyai gesekan dalam dan kohesi.
2. Bidang runtuh adalah sebuah bidang rata (seperti *BC* pada Gambar 11-2*b*). Permukaan urugan balik (backfill surface) merupakan bidang datar.
3. Dengan nilai yang sama tahanan gesekan didistribusi sepanjang permukaan runtuh yang rata, dan koefisien gesekan tanah ke tanah f— tan ϕ·
4. Keping runtuh (failure wedge) adalah melalui translasi sebuah benda tegar.
5. Adanya gesekan dinding, yaitu, keping runtuhan bergerak dalam kaitan terhadap bagian punggung dari dinding, maka berkembanglah suatu gaya gesek antara tanah dan dinding. Sudut gesekan ini biasanya dinamakan δ.
6. Keruntuhan adalah suatu persoalan peregangan dinding; tinjaulah satu satuan panjang dari sebuah benda yang panjangnya tak berhingga.

Kekurangan utama dalam teori Coulomb ini ialah asumsinya bahwa, tanah ideal dan permukaan runtuh adalah bidang rata (meskipun untuk pasir bersih dalam kasus tekanan aktif, gambar-gambar dari dinding-dinding model menunjukkan bahwa daerah patahan itu hampir merupakan suatu bidang seperti *BC* pada Gambar 11-2*b*.

Persamaan-persamaan yang didasarkan pada teori Coulomb untuk tanah tak kohesi didapat dari Gambar 11-4 dan Gambar 11-5. Berat potongan tanah *ABE* adalah

$$W = \gamma A(1) = \frac{\gamma H^2}{2 \sin^2 \alpha}\left[\sin(\alpha + \rho)\frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin(\rho - \beta)}\right] \qquad (a)$$

GAMBAR 11-4. Keping runtuhan (failure wedge) yang digunakan dalam menurunkan persamaan Coulomb untuk tekanan aktif. Perhatikan bahwa β dapat mempunyai harga ± dan $0 < \alpha < 180°$.

Gaya aktif P_a adalah suatu komponen dari vektor berat seperti yang digambarkan dalam Gambar 11-5*c*. Dengan memakai rumus sinus, maka kita dapatkan

$$\frac{P_a}{\sin(\rho - \phi)} = \frac{W}{\sin(180 - \alpha - \rho + \phi + \delta)}$$

atau

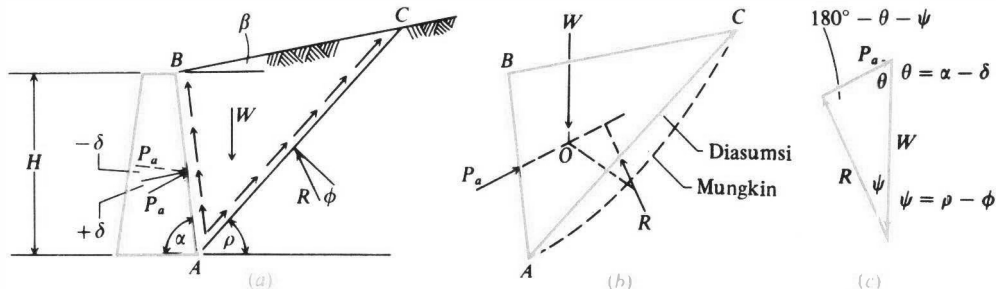
$$P_a = \frac{W \sin(\rho - \phi)}{\sin(180 - \alpha - \rho + \phi + \delta)} \qquad (b)$$

Dari Persamaan (*b*) dapat dilihat bahwa harga $P_a = f(\rho)$; artinya semua faktor lainnya yang diberikan untuk sebuah soal adalah konstan, sedangkan harga P_a yang paling diperlukan adalah harga yang terbesar. Dengan menggabungkan Persamaan (*a*) dan (*b*), kita dapatkan

$$P_a = \frac{\gamma H^2}{2 \sin^2 \alpha}\left[\sin(\alpha + \rho)\frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin(\rho - \beta)}\right]\frac{\sin(\rho - \phi)}{\sin(180 - \alpha - \rho + \phi + \delta)} \qquad (c)$$

maka harga maksimum dari gaya dinding aktif P_a diperoleh sebesar $dP_a/dp = 0$ untuk menghasilkan

$$P_a = \frac{\gamma H^2}{2}\frac{\sin^2(\alpha + \phi)}{\sin^2 \alpha \sin(\alpha - \delta)\left[1 + \sqrt{\dfrac{\sin(\phi + \delta)\sin(\phi - \beta)}{\sin(\alpha - \delta)\sin(\alpha + \beta)}}\right]^2} \qquad (11\text{-}1)$$

GAMBAR 11-5 (*a*) Kondisi-kondisi keruntuhan yang diasumsikan; (*b*) menunjukkan bahwa gaya-gaya resultan tidak melalui titik 0; sehingga kesetimbangan statis (static equilibrium) tidak dipenuhi; (*c*) segitiga gaya untuk menghasilkan P_a.

Jika $\beta = \delta = 0$ dan $\alpha = 90°$ (untuk sebuah dinding vertikal licin yang mempunyai urugan balik horisontal) maka Persamaan (11-1) dapat disederhanakan menjadi

$$P_a = \frac{\gamma H^2}{2} \frac{(1 - \sin\phi)}{(1 + \sin\phi)} = \frac{\gamma H^2}{2} \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) \tag{11-2}$$

yang juga merupakan persamaan Rankine untuk tekanan tanah aktif yang akan ditinjau dalam bagian berikutnya. Persamaan (11-2) mempunyai bentuk umum

$$P_a = \frac{\gamma H^2}{2} K_a$$

di mana

$$K_a = \frac{\sin^2(\alpha + \phi)}{\sin^2\alpha \sin(\alpha - \delta)\left[1 + \sqrt{\dfrac{\sin(\phi + \delta)\sin(\phi - \beta)}{\sin(\alpha - \delta)\sin(\alpha + \beta)}}\right]^2} \tag{11-3}$$

dan merupakan sebuah koefisien yang mengandung α, β, δ, dan ϕ, tapi tidak tergantung pada γ dan H. Tabel 11-1 memberikan harga-harga K_a untuk sudut-sudut tertentu, dan suatu program komputer dapat ditulis dengan mudah untuk menentukan harga-harga K_a untuk kombinasi-kombinasi sudut lain.

Tekanan tanah pasif diturunkan dengan cara yang serupa kecuali inklinasi pada dinding dan segitiga gayanya seperti terlihat dalam Gambar 11-6.

Dari Gambar 11-6 terlihat bahwa berat dari massa yang runtuh yang diasumsikan adalah

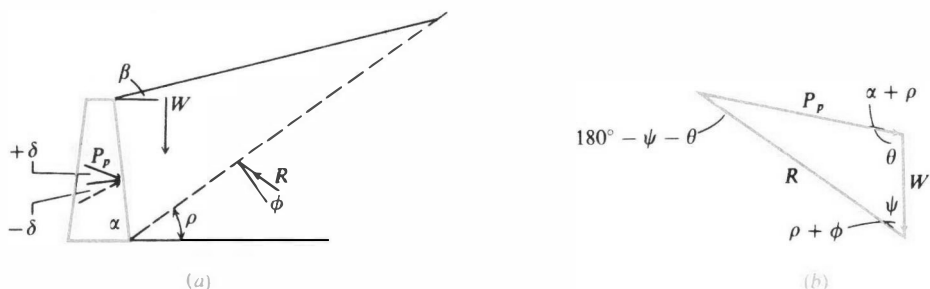
$$W = \frac{\gamma H^2}{2} \sin(\alpha + \rho) \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin(\rho - \beta)} \tag{d}$$

dan dengan menggunakan rumus sinus dari segitiga gaya diperoleh

$$P_p = W \frac{\sin(\rho + \phi)}{\sin(180 - \rho - \phi - \delta - \alpha)} \tag{e}$$

Dengan menetapkan turunan $dP_p/d\rho = 0$ maka diperoleh harga minimum dari P_p sebagai berikut:

$$P_p = \frac{\gamma H^2}{2} \frac{\sin^2(\alpha - \phi)}{\sin^2\alpha \sin(\alpha + \delta)\left[1 - \sqrt{\dfrac{\sin(\phi + \delta)\sin(\phi + \beta)}{\sin(\alpha + \delta)\sin(\alpha + \beta)}}\right]^2} \tag{11-4}$$

GAMBAR 11-6. (*a*) Keping runtuhan dan gaya-gaya yang bekerja untuk tekanan pasif; (*b*) poligon gaya untuk perhitungan tekanan pasif.

Untuk sebuah dinding vertikal licin (smooth vertical wall) yang mempunyai urugan balik horisontal ($\delta = \beta = 0$ dan $\alpha = 90°$), maka Persamaan (11-4) disederhanakan menjadi

$$P_p = \frac{\gamma H^2}{2} \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} = \frac{\gamma H^2}{2} \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \tag{11-5}$$

Persamaan (11-4) dapat juga ditulis:

$$P_p = \frac{\gamma H^2}{2} K_p$$

di mana

$$K_p = \frac{\sin^2(\alpha - \phi)}{\sin^2\alpha \sin(\alpha + \delta)\left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta)\sin(\phi + \beta)}{\sin(\alpha + \delta)\sin(\alpha + \beta)}}\right]^2} \tag{11-6}$$

Tabel 11-2 memberikan harga-harga K_p untuk sudut-sudut khusus ϕ, α, δ, dan β.

Gambar 11-1 memperlihatkan bahwa tekanan tanah tergantung pada tekanan *efektif* di dalam tanah dan bukan tergantung pada tekanan total. Ini berarti bahwa tekanan dinding di bawah permukaan air adalah jumlah tekanan hidrostatik dan tekanan tanah lateral dari berat satuan efektif γ' dari tanah.

Tabel 11-1 Koefisien-koefisien K_a tekanan tanah aktif berdasarkan persamaan Coulomb (11-3).

ALPHA = 90 BETA = -10

δ	ϕ = 26	28	30	32	34	36	38	40	42
0	0.354	0.328	0.304	0.281	0.259	0.239	0.220	0.201	0.184
16	0.311	0.290	0.270	0.252	0.234	0.216	0.200	0.184	0.170
17	0.309	0.289	0.269	0.251	0.233	0.216	0.200	0.184	0.169
20	0.306	0.286	0.267	0.249	0.231	0.214	0.198	0.183	0.169
22	0.304	0.285	0.266	0.248	0.230	0.214	0.198	0.183	0.168

ALPHA = 90 BETA = -5

δ	ϕ = 26	28	30	32	34	36	38	40	42
0	0.371	0.343	0.318	0.293	0.270	0.249	0.228	0.209	0.191
16	0.328	0.306	0.284	0.264	0.245	0.226	0.209	0.192	0.176
17	0.327	0.305	0.283	0.263	0.244	0.226	0.208	0.192	0.176
20	0.324	0.302	0.281	0.261	0.242	0.224	0.207	0.191	0.175
22	0.322	0.301	0.280	0.260	0.242	0.224	0.207	0.191	0.175

ALPHA = 90 BETA = 0

δ	ϕ = 26	28	30	32	34	36	38	40	42
0	0.390	0.361	0.333	0.307	0.283	0.260	0.238	0.217	0.198
16	0.349	0.324	0.300	0.278	0.257	0.237	0.218	0.201	0.184
17	0.348	0.323	0.299	0.277	0.256	0.237	0.218	0.200	0.183
20	0.345	0.320	0.297	0.276	0.255	0.235	0.217	0.199	0.183
22	0.343	0.319	0.296	0.275	0.254	0.235	0.217	0.199	0.183

ALPHA = 90 BETA = 5

δ	ϕ = 26	28	30	32	34	36	38	40	42
0	0.414	0.382	0.352	0.323	0.297	0.272	0.249	0.227	0.206
16	0.373	0.345	0.319	0.295	0.272	0.250	0.229	0.210	0.192
17	0.372	0.344	0.318	0.294	0.271	0.249	0.229	0.210	0.192
20	0.370	0.342	0.316	0.292	0.270	0.248	0.228	0.209	0.191
22	0.369	0.341	0.316	0.292	0.269	0.248	0.228	0.209	0.191

ALPHA = 90 BETA = 10

δ	ϕ = 26	28	30	32	34	36	38	40	42
0	0.443	0.407	0.374	0.343	0.314	0.286	0.261	0.238	0.216
16	0.404	0.372	0.342	0.315	0.289	0.265	0.242	0.221	0.201
17	0.404	0.371	0.342	0.314	0.288	0.264	0.242	0.221	0.201
20	0.402	0.370	0.340	0.313	0.287	0.263	0.241	0.220	0.201
22	0.401	0.369	0.340	0.312	0.287	0.263	0.241	0.220	0.201

ALPHA = 90 BETA = 15

δ	ϕ = 26	28	30	32	34	36	38	40	42
0	0.482	0.440	0.402	0.367	0.334	0.304	0.276	0.251	0.227
16	0.447	0.408	0.372	0.340	0.310	0.283	0.258	0.234	0.213
17	0.447	0.407	0.372	0.339	0.310	0.282	0.257	0.234	0.212
20	0.446	0.406	0.371	0.338	0.309	0.282	0.257	0.234	0.212
22	0.446	0.406	0.371	0.338	0.309	0.282	0.257	0.234	0.212